DOI: 10.5846/stxb201704220730
李兰,李锋.“海绵城市”建设的关键科学问题与思考.生态学报,2018,38(7):2599-2606.
Li L, Li F.The key scientific issues and thinking on the construction of “Sponge City”.Acta Ecologica Sinica,2018,38(7):2599-2606.

“海绵城市”建设的关键科学问题与思考

李 兰[1,2],李 锋[1,3,*]

1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
2 延边大学湿地研究中心,延吉 133000
3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:“海绵城市”是学术界、政府和企业界特别关注的热点之一,具有有效防止城市雨洪灾害、改善水生态和水环境、提高生物多样性等多方面的服务功能,有助于城市社会经济发展。在目前全国范围内发生城市内涝的严重情况下,科学地进行“海绵城市”建设显得尤为重要。对“海绵城市”的研究背景、概念与内涵、建设途径、主要技术、国内发展现状等进行了总结和归纳,并提出“海绵城市”建设的关键科学问题,并进行深入思考,建立“SPONGE”框架来概括整个“海绵城市”的建设内容,为今后的“海绵城市”研究和建设提供参考。

关键词:海绵城市;城市内涝;雨洪管理;生态系统服务;“SPONGE”框架

The key scientific issues and thinking on the construction of “Sponge City”

LI Lan[1,2], LI Feng[1,3,*]

1 *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *Wetland Research Center of Yanbian University, Yanji* 133000, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: “Sponge City” has emerged as a hot scientific and governmental research topic given its ability to effectively control disasters resulting from urban storm water and flooding. “Sponge City” not only supplies groundwater and addresses water shortages but also improves urban water environments, biodiversity, and urban landscapes, all of which contribute to the development of an urban economy and society. Accordingly, “Sponge City” has become a principal force in the new generation of urban construction projects. The scientific construction of a “Sponge City” has become especially important in light of the recent urban flooding in the country. This paper summarizes the background, concept, and connotation of “Sponge City” construction, its relationship with ecological infrastructure, its construction route, and its main technology. We identified several key scientific issues and a construction perspective for “Sponge City” based on four aspects, including improving the ecosystem services of “Sponge City,” identifying valuation indicators and establishing a management system, and promoting awareness. This paper identified issues related to the construction of “Sponge City” and examines how its contents must be improved in the future. We also advanced the overall framework of “SPONGE,” which includes service, participation, organization, natural ecology, green infrastructure, and ecological pattern. The key contents and vital parts of a “Sponge City” are generalized from this framework, which is expected to provide important materials for further research on this topic.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(71533004, 71734006);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502800)
收稿日期:2017-04-22; **网络出版日期**:2018-01-04

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: lifeng@ rcees.ac.cn

Key Words: sponge city; urban waterlogging; storm water management; ecosystem service; "Sponge City" framework

水是一切生命系统的基础,又是人类赖以生存和发展的重要资源。水生态系统可提供多种生态系统服务,如产品提供功能、调节功能、文化功能、生命支持功能等等[1],具有巨大的生态系统服务价值。研究表明,全球湿地生态系统服务总价值约为 4879×10^9 元/a,单位面积价值约为 1.4785 美元 hm^{-2} a^{-1}[2]。但随着城市化进程加快,城市基础设施建设速度跟不上城市化发展步伐,不合理的利用与开发水资源,导致水资源短缺、水质严重污染,水生态系统服务整体退化。不科学的工程措施也导致了城市建筑多、绿地少、排水及雨水收集系统不发达,雨水排放无法满足现代城市管理要求,给城市带来了很多水生态和水环境问题[3-4]。建筑、道路、广场等高强度人工建设导致下垫面过度硬化,改变了城市原有的自然生态本底和水文特征,使地表径流从10%增加到 60%,下渗补充的地下水急剧减少,甚至是零[5]。据 2010 年住建部对全国 351 个城市的内涝情况进行调研显示,2008—2010 年间,全国 62%的城市发生过不同程度的积水内涝,内涝灾害超过 3 次的城市有137 个,占全部城市数量的 39%。2011 年南京"7.18"特大暴雨、2012 年北京"7.21"特大暴雨、2013 年厦门、2014 年深圳、2015 年上海、2016 年武汉大暴雨等每年夏季不断发生,"城市看海"现象非常严重。因此,频发的城市内涝使得越来越多的人认识到水生态系统以及城市生态基础设施的重要性,传统的单一"快速排放"理念的灰色雨水基础设施与管理模式,已难以应对快速城市化过程中出现的雨水困境。

为了应对如此突出的城市水问题,国家越来越重视城市雨洪管理以及水生态系统服务,大力推进"海绵城市"建设。"海绵城市"是以雨洪管理为目标,加强生态基础设施和排水系统建设的新的城市建设模式,可以缓解城市内涝、水资源短缺、城市热岛,提高生态环境质量、生物多样性,能缓解城市多方面的生态环境问题,受到相关部门的很大关注,并成为一项重要的国策[5]。本文拟在湿地及其生态系统服务的相关研究基础上,归纳"海绵城市"的研究背景、概念与内涵、与生态基础设施的关系、国内的研究现状,并提出科学问题以及建设思考,为今后的研究和建设提供依据和决策参考。

1　"海绵城市"的概念及内涵

1.1　"海绵城市"的定义及发展过程

城市建设行业内和学术界习惯用"海绵"来比喻城市的某种吸附能力,例如澳大利亚人口研究学者布吉(Budge)应用海绵来比喻城市对人口的吸附现象[3,6-7],Ignacio F. Bunster-Ossa 用海绵城市来形容城市像海绵一样处理雨洪自然事件问题的弹性能力[6,8]。由于其与生态雨洪管理理论和思想一致,更多的学者用海绵比喻了城市或土地的雨涝调蓄能力[9]。对于"海绵城市"的概念,出现了多种名称,主要有绿色海绵、海绵体城市、生态海绵城市等,最终在国家政策层面确定了"海绵城市"[6],并被定义为城市像海绵体一样,下雨时能够吸水、蓄水、净水、渗水,需要时将蓄存的水"释放"出来并加以利用,形成具有"弹性"的城市[10]。"弹性"指的是能承受一系列改变并保持结构和功能的能力、自组织能力和学习适应能力,具有适应性和弹性的城市水系设施是弹性城市的重要组成元素[6,11-12]。"海绵城市"是以"自然积存、自然渗透、自然净化"的生态基础设施来实现,发挥地形地貌等原始生态本底对雨水的渗透作用、植被与湿地等对水质的净化作用、自然和人工相结合的手段,使城市对雨水具有吸收和释放的作用。如人工湿地、雨水花园、屋顶绿化、下凹式绿地、植草沟、生态公园等城市绿地和城市水体是主要的"海绵体"。

国外早在 20 世纪 60 年代开始了海绵城市相关建设,不同国家按城市开发、设计赋予了不同的名称。如美国的最佳管理措施(BMPs)和低影响开发(LID)、英国的可持续排水系统(SUDS)、澳大利亚的水敏感性城市设计(WSUD)、新西兰的低影响城市设计与开发(LIUDD)等[13-14],都是以"海绵城市"理论出发,考虑了水量和水质并重方面,推进雨水收集与利用,追求雨洪管理设施和景观的有机融合,实现了与水环境的和谐、可持续发展的城市建设。

1.2　"海绵城市"的内涵与尺度问题

"海绵城市"实际上是一种城市建设模式的转变。传统的城市建设模式主要依靠管渠、泵站等"灰色基础

设施"来组织排放径流雨水,以"快速排除"和"末端集中"控制为主要的设计原则,而海绵城市则强调优先利用植草沟、雨水花园、生物滞留池、下沉式绿地等生态基础设施来组织排放径流雨水,以"慢排缓释"和"源头分散"控制为主要设计理念,强调采用低影响开发技术,合理利用雨洪资源、有效控制雨水径流,从而建立水资源与城市协调发展的模式。"海绵城市"是一个生命的系统,用来综合地、系统地、可持续地来解决水问题[15],提供人类生活所需求的生态系统服务,是城市发展的刚性骨架[3,16-18]。从水安全格局到水生态基础设施,不仅维护城市雨涝调蓄、地下水回补、雨污净化、土壤净化,还能使地表径流量保持不变[3]。

关于"海绵城市"建设的尺度问题,具有不同的观点。俞孔坚[19]认为城市水问题的解决前提是保护区域水生态过程,因此,海绵系统构建是跨尺度的综合而系统的,并且对应于现行的城市规划体系,分国土、流域、区域的尺度来分析问题。但也有很多研究认为[5,10,20],"海绵城市"就是低影响开发建设,通过绿地、湿地、雨水花园等绿色基础设施来实现。对于专家们不同的意见,可归纳为低影响开发雨水系统是一个微观的城市开发技术,可以缓解局部的水循环,但不能完全解决城市水问题,需要宏观尺度的研究和解决方案。

本文认为,"海绵城市"是一个主动的、具有选择性的建设模式,不是被动的拟合传统模式和思想的单一理论和建设。针对城市不同的水问题,流域、区域、新建区的"海绵体"发挥的生态功能和生态价值有所不同,取决于地理单元的生态特性、评价目标、评价方法等主观的和客观的各种要素。其建设的尺度因具体的水环境目标而异。

2　"海绵城市"与生态基础设施的关系

城市生态基础设施是社会赖以生存与发展的基本物质条件,也是城市及其居民持续获得生态系统服务的保障[21]。从改造自然,改变原有自然生态的粗放式建设模式转化为顺应自然、保护原有的城市生态系统,减少地表径流量,提倡低影响开发建设[20],通过土地和城市的规划设计,最终成为水生态基础设施[3]。"海绵城市"实际上是生态基础设施的融合,给城市及其居民带来持续的生态系统服务。美国 High point 住宅区,是典型的低影响开发(LID)技术示范区和"海绵城市"建设案例。High point 原本是一个能够容纳多阶层的混合式居住区,建筑密度较高,屋顶的汇水面积较大,通过屋顶绿化、植被浅沟、不透水铺装等措施提高了住宅区的海绵性[22]。澳大利亚墨尔本成为城市雨洪管理领域的世界领军城市,是以"源头控制"为原则,就地解决水量和水质问题,过程控制,避免下游雨水集中导致排水压力,首次引入了雨水、地下水、饮用水、污水及再生水的全水环节管理体系[22]。德国城市地下管网的发达程度与排污能力处于世界领先地位,城市拥有现代化的排水设施,因地制宜的处理污水和雨水,不仅能够高效排水排污,还能起到平衡城市生态系统的作用[22]。日本早在 20 世纪 80 年代开始推广雨水资源的综合利用,90 年代正式要求新建和改建的大型公共建筑上必须设置雨水就地下渗设施,对城市新开发土地每公顷应附设 500m^3的雨洪调蓄池,改善了城市水问题[22]。

如此,生态基础设施是城市可持续发展的重要基础,也是建设"海绵城市"的重要保证。在城市生态环境问题严重的情况下,有机整合有生命的生态基础设施和无生命的灰色基础设施,形成协同共生、循环再生的综合网络体系,并开发各种生态适宜、经济可行和社会可接受的技术集成是解决城市水生态环境问题的有效途径。

3　建设途径与主要技术

"海绵城市"建设是一个跨行业、跨部门、跨学科的系统工程,涉及到规划、建筑、排水、结构、道路、园林景观、水文等多个专业[23],需要将从生态学理念植入建设工程,进行符合生态学原则的城市建设[24]。《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》(国办发[2015]75 号)指出海绵城市建设是通过加强城市规划建设管理,充分发挥建筑、道路和绿地、水系等生态系统对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用,有效控制雨水径流,实现自然积存、自然渗透、自然净化的城市发展方式。主要建设思想为保护城市原有的河流、湖泊、湿地、坑塘、沟渠等生态敏感区,发挥其海绵功能,利用天然植被、土壤、微生物等治理水环境,再结合生态基础设施和低影

响开发技术,逐步恢复被破坏的城市生态系统。建设途径主要有 3 个方面,一是对城市原有生态系统的保护;二是生态恢复和修复;三是低影响开发[10]。主要技术以“渗、滞、蓄、净、用、排”等六大要素来实现,分收集、蓄水和用水三大措施。“海绵城市”强调“以自然为主”、“源头控制”和“因地制宜”的基本原则,保护自然、师法自然、尽可能保留城市生态空间,恢复生物多样性,营造优美的景观环境。保护与修复措施包括从宏观尺度开始,识别生态斑块,构建生态廊道,加强斑块之间的联系,形成网络化,并划定蓝线与绿线,进行水生态环境修复;对微观的城市道路、城市绿地、城市水系,居住区及具体建筑,采取要强制性手段保护生态斑块,维持其自身的调蓄能力,加强源头控制,形成不同尺度的生态海绵体[13,20]。这些过程是在城市总体规划、专项规划、控制性详细规划等不同层次的城市规划区海绵城市设计与改造中实现的。

表 1 海绵城市建设的主要技术

Table 1 Main technology of sponge city construction

分类 Classification	功能特征 Function characteristics	主要技术类型 Types of main technology
渗透与过滤 Penetration and filtration	通过雨水渗透、过滤,减少径流量,补充地下水,保护地表与水资源	雨水花园、人工湿地、下凹式绿地、滞留渗透绿化带、生态滞留区、植草沟、植被浅、透水铺装地面、绿色街道、绿色停车场等
下渗与收集 Infiltration and collection	通过雨水吸纳和蓄积,保护与促进水资源利用	绿色屋顶、生态沟、雨水调蓄池、多功能调蓄池、雨水桶、入渗井、地下水箱、渗透管沟、透水箱等
调蓄与利用 Storage and use	通过雨水净化处理,加强雨洪利用,提高景观效果	生活用水、景观用水、环保卫用水等

4 国内发展现状

在政策管理方面,2013 年 12 月 12 日,习近平总书记在《中央城镇化工作会议》的讲话中提出“在提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来,利用自然的力量排水,建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市”。为此,2014 年 10 月,住房城乡建设部发布了《海绵城市建设技术指南》,强调了城市雨水管理顶层设计的重要性,以及规划引领,生态优先为基本原则的城市建设。2015 年 8 月,《海绵城市建设绩效评价方法》明晰了对中央财政资金的使用要求,并对试点示范城市的建设成效提出了指引。根据《指南》和相关标准规范,中国建筑标准设计研究院初步构建了“海绵城市建设标准设计体系”,包括新建、扩建和改建的海绵型建筑与小区,道路与广场、公园绿地、城市水系等相关技术和基础设施的建设及管理。在国家政策的支持下,2015 年和 2016 年,财政部、住房城乡建设部、水利部组织开展了海绵城市试点工作。迁安、白城、镇江、嘉兴、池州、厦门等 16 个城市入选第一批试点城市,福州、珠海、大连、深圳、上海、青岛、天津、北京等 14 个城市入选第二批试点城市,有序开展海绵城市建设。另外,中央财政部引入政府和社会资本合作(PPP)模式,提高政策性金融支持。《政府和社会资本合作模式操作指南(试行)》规范了其项目识别、准备、采购、执行、移交等各环节操作流程,《政府和社会资本合作项目政府采购管理办法》全面规范了政府采购行为。

在科学研究方面,早在 2003 年,俞孔坚曾用“海绵”来比喻自然系统的洪涝调节能力,指出河流两侧的自然湿地如同海绵,调节河水之丰俭,缓解旱涝灾害[25],并针对城市突出的水问题,提出了综合解决城乡水问题的生态基础设施途径。至今,已形成一套“海绵城市”的规划理论与方法,长期以来持续应用于全国一系列城市生态规划中[26-27],如天津桥园、哈尔滨群力雨洪公园和文化中心湿地公园、金华燕尾洲公园、六盘水明湖湿地公园等创造了雨洪管理实践的成功范例[28]。根据中国知网显示,继 2011 年由北京清华城市规划设计研究院发表的《基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究》和 2012 年北京大学建筑与景观设计学院发表的《构建城市绿色海绵—生态雨洪调蓄系统规划研究》之后,2014 年开始大量发表海绵城市的相关文章,目前有 2000 多篇相关的中文期刊文献。关于海绵城市方面的书籍也陆续出版,从 2015 年开始,伍业钢的《海绵城市设计:理念、技术、案例》,俞孔坚的《海绵城市——理论与实践》,戴滢滢的《海绵城市——景观设计中的雨洪管理》,刘云胜等的《理想空间——海绵城市》,肖楚田等的《海绵城市:植物净化与生态修复》,任心欣的《海

绵城市建设规划与管理》,广西师范大学出版社的《海绵公园》,中国林业出版社的《海绵城市与园林景观》,中国建材工业出版社的《海绵城市建设实用技术手册》等,十多部书籍陆续出版表明当前我国对海绵城市研究和建设的关注和重视。

5　关键科学问题与建设思考

国外早已重视暴雨洪涝、雨水收集与利用、美化景观与城市设计等,制定了相应的管理政策。我国目前“海绵城市”研究和建设在不断发展,但还是存在以下几方面的问题。

5.1　“海绵城市”的科学研究

从目前海绵城市概念与内涵、实践案例等研究来总结,“海绵城市”的主要理念可以归纳为一个核心指导思想、三大建设途径、三大雨水系统、四大关键目标。核心指导思想是低影响开发理念;三大建设途径是生态系统保护、修复与低影响开发建设;三大雨水系统是低影响开发雨水系统、传统雨水管渠系统和超标雨水径流系统;四大关键目标是水安全、水环境、水资源和水生态城市的实现。大多数研究倾向于以“低影响开发建设”来代替“海绵城市”建设,而“海绵城市”是解决城市水问题的系统工程,与多个部门的统筹规划、设计、建设等密切相关,并且受到人口、经济、自然等多种要素的影响,需要各方面的综合研究。研究尺度上,在开发微观尺度的建设技术同时,应从宏观、中观、微观等不同尺度来综合研究海绵系统和海绵体,进行中远期的国家规划建设。如在宏观尺度,流域空间格局上进行水生态安全格局分析,使它成为区域的生态基础设施;中观尺度上,有效利用规划区域内的河道、坑塘,集水区和汇水节点,形成“海绵系统”;最后进行微观的“海绵体”研究[3]。这些不同尺度的研究和建设,可以互为补充,共同构成一个完整的生态基础设施网络,特别在水生态系统的尺度上,研究海绵体的生态系统服务和生态演变机制,使研究具有科学性、系统性、创新性和可操作性。

5.2　“海绵城市”的生态系统服务

提高生态系统服务是城市生态基础设施建设的核心与关键[20],也是“海绵城市”建设最终的目标。Costanza R[29]研究表明,解决城市水问题,必须把研究对象从水体本身扩展到水生态系统,通过生态途径,对水生态系统结构和功能进行调理,增强生态系统的整体服务功能。城市水生态系统在城市圈内与各环境要素和社会经济之间相互以水为中心,形成复杂的生态系统,并且大部分与湿地生态系统相连[30-31]。据美国威斯康星州河流流域测算,它拥有 15%湿地率,洪峰高度比无湿地覆盖河流低 60%—65%[32]。由此可见,湿地生态系统与“海绵城市”密切相关,对减少城市内涝也有明显效果,在一般情况下,微观尺度的“海绵城市建设”可视为湿地生态系统的建设。湿地生态系统作为地球上三大生态系统之一,是城市生态系统的重要组成部分,具有其他生态系统不可替代的多种生态系统服务。湿地生态系统可以提供淡水资源、生活及生态景观用水等供给服务功能;提供调节气候、调蓄洪水及地表水、补充地下水、水质净化、固碳等调节服务功能;提供休闲娱乐,生态教育等文化服务功能;还有维持生物多样性的支持功能[33]。然而,随着城市进程的加快,城市湿地不断被破坏,严重损坏了城市的“海绵性”,导致了如今的“城市看海”现象。因此,要从湿地生态系统服务角度出发,对各类“海绵体”的结构、生态过程、功能及其机理有明确的研究和修复目标,进行长期的定量评价、监测和管理方面的研究,增强生态系统的整体服务功能,提高其社会、经济和生态综合效益。

5.3　“海绵城市”的评价指标与管理体系

对于海绵城市建设和生态基础设施的评价和管理,国内还处于摸索发展阶段。目前《海绵城市建设绩效评价方法》中的评价指标和要点为水生态、水环境、水资源、水安全、制度建设及执行情况、显示度等六个方面,包括 18 项指标。有关部门把海绵城市建设重点放在城市规划、城市设计、施工建设、建设技术、监理和投资等六个环节上。从生态系统角度看,现行的评价指标不能全面反映海绵城市生态系统服务的强弱,需要综合的水生态系统评价与针对性的生态基础设施的评价相结合,建立不同空间尺度的评价指标体系。湿地生态系统具有水文地貌分类(HGM)、湿地快速评价法(RAM)、生物完整性指数法(IBI)、湿地评价技术(WET)等生态功能评价方法,是根据水文、地形、生物化学、生物栖息地等生态要素来进行评价的。而且 RAM 评价方

法还包括洪水储存与控制能力、侵蚀控制、生物多样性与生物栖息地功能、水质保护与改善能力、美观与文化娱乐等生态系统服务作为评价指标，可以针对性地进行生态系统服务评价与恢复。这些评价指标与方法在“海绵城市”评价上是可借鉴和应用的。但对于不同基础设施进行统一的服务功能评价是有缺陷的，还是要有客观的综合评价指标体系。在生态基础设施管理方面，相关管理方法较为分散，缺乏系统而全面的管理体系和法律法规[34]，要借鉴国内外先进经验，必须改进城市各类设计、建设工程、标准、指标和管理规范，加强海绵城市生态系统服务的定量研究和评估模型研究，整合多尺度生态基础设施管理研究，健全海绵城市评价与管理体系。

5.4　“海绵城市”建设的系统框架

我国地理位置与季风气候决定了多水患，暴雨、洪涝、干旱等灾害集中在夏季，占到全年的 60%—80%，气候变化的不确定性带来了暴雨洪水频发、洪峰洪量加大等风险，导致每年夏季成为内涝多发时期。而且快速城镇化也带来了水资源过度开发、水质严重污染和水资源严重紧缺等城市生态环境问题。因此，解决这些城市生态环境问题需要考虑不同的地理环境特征和空间格局，统筹降水、地表水和地下水的系统性，协调水循环利用，考虑其复杂性、多样性和长期性。

“海绵城市”的本质是科学地考虑城市生态需求，改善城市的水循环过程，让水在城市的迁移、转化和转换等活动中更加“自然”[35]。整体上，“海绵城市”建设需要规划-设计-建设-管理的一套系统性建设途径。在规划方面，微观的海绵城市规划是解决不了最终的城市水问题，需要宏观到微观的统一的规划体系，能体现出国土、流域、城市的水生态安全格局的综合城市规划体系。在此基础上，确定子系统规划，再进行低影响开发建设。宏观上全流域-区域水系-河湖水系-湿地生态系统连接是关键，微观的区域空间-水生态系统-土地利用-景观格局-自然生态也是必不可少的。在建设方面，海绵城市建设模式应多元化。特别在一个热点的兴起时期，盲目模仿国外实践案例去建设绿地、湿地等基础设施会缺乏自己的特色。海绵城市建设应考虑水生态格局以及生态系统对人类的服务功效，实施相应的生态规划、设计和建设措施，发展“因地制宜”、“源头控制”、“以自然为本”的建设模式，体现出生态安全与保障、生态景观和文化共同发展的生态城市内涵和要求。

综上所述，“海绵城市”建设需要考虑生态格局、生态基础设施、生态系统服务和管理等多方面的要素，并成为研究和建设重点内容，本文创新性地建立海绵城市建设的“SPONGE”系统框架（图 1）。

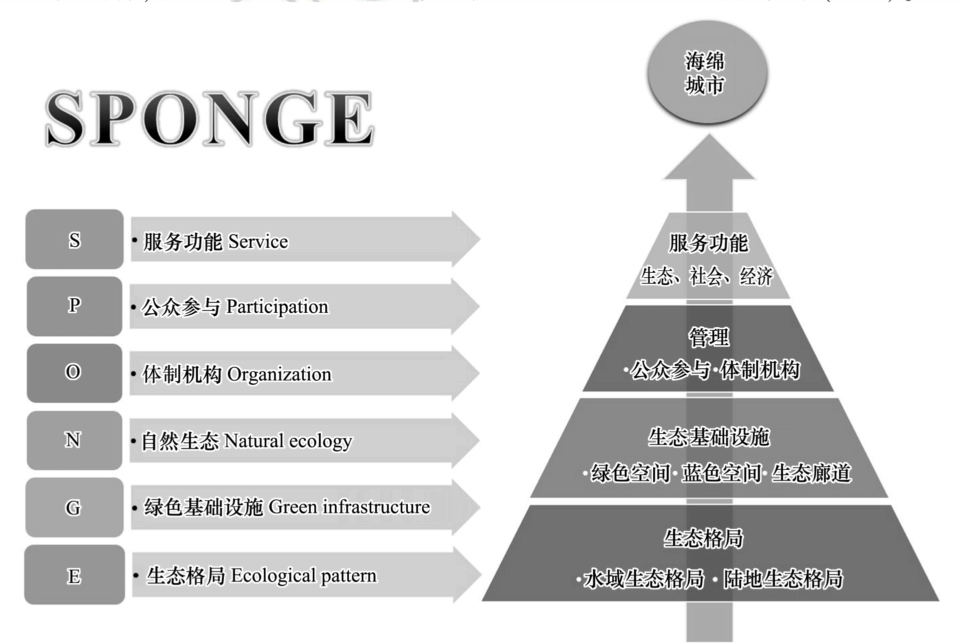


图 1　海绵城市建设的系统框架

Fig.1　Systematic framework for sponge city construction

(1) Ecological pattern:生态格局是海绵城市建设最基本和最关键的内容。“海绵城市建设”需要纳入生态学理念,最大限度地保护与遵循原始生态格局,科学合理地制定城市规划建设。根据城市生态学的理论和方法,从水域生态格局和陆地生态格局来整合国土尺度的“海绵城市规划和建设”,再分散到流域、区域、海绵体等,形成水生态格局网络化,保障水生态循环。

(2) Green infrastructure:绿色基础设施强调绿地、湿地等生态用地斑块与生态廊道的有机结合和网络化,这是海绵城市建设的核心。绿色基础设施是一个多功能的蓝绿空间网络,连接着水系、湿地、林地以及其他自然环境,维护生态系统自然演替进程。包括重要的雨洪生态调控设施,从源头上使暴雨渗入地表,通过蒸发、净化、再利用,有效提高海绵性。

(3) Natural ecology:传统的城市建设是“以人为主”的建设模式,治标不治本,海绵城市是“以自然为主”的生态建设模式。海绵城市建设是以“源头控制”、“分散式”、“生态化”、“多目标” 为指导思想的新型雨水控制利用系统,是我国生态文明建设的重要内容之一。要加强建设城市绿地、保护城市水生态系统,维护生态空间,遵循自然规律,减轻大自然的灾害。

(4) Organization:机构和组织管理是实现“海绵城市”的重要保障。海绵城市建设工作涉及到城市方方面面,需要国土、规划、水务、林业、农业、环保、建设、管理等部门的协调配合,号召社会各阶层积极参与。政府部门要建立系统的海绵城市建设工作与管理体系,防止分割管理方式,提高整体性和系统性,并且加强相关管理和政策支持。

(5) Participation:海绵城市建设需要全社会转变观念、形成共识,充分认识其建设的必要性、紧迫性并付诸实际行动,需要各个相关部门和行业同步推进,特别是公众的大力参与和支持。在规划、管理、资金问题上实行优惠政策,引导公众和社会力量参与,采取 PPP 模式引进社会资本,鼓励企事业单位参与城市生态基础设施建设,增强“海绵城市”实践和成效。

(6) Service:提高城市生态系统服务是海绵城市建设的最终目标。通过合理的生态格局规划,充分保护城市原有生态系统,建设不同尺度的生态基础设施,强化体制与政策支持,结合机构管理和公众参与,才能发挥高效的生态系统服务,包括生态和社会经济服务功能,为基于人类福祉和人与自然和谐的生态城市服务。

6　结语

城市是一类以人类活动为中心的社会-经济-自然复合生态系统[36],城市发展需要注重这三个不同子系统的耦合关系,任何一个环节出现失误,都会影响城市整体的健康运行。但改革开放以来,我国经历了快速城市化过程,在促进经济发展和社会进步的同时,局部严重破坏了自然生态系统,出现诸多城市生态环境问题。我国城镇化率由 1978 年的 17.9%提高到 2015 年的 56.1%,雨水快排模式使城市失去了“渗、透、蓄”的水生态系统服务,导致了如今城市内涝和“城里看海”的现象。城市水问题不仅给人们出行带来不便,还造成严重的生命和财产损失。“海绵城市”是在此背景下提出的一个城市发展的新理念、新方式和新模式[35],可以缓解水资源短缺、洪涝灾害、城市热岛、雾霾等多方面的城市化带来的生态环境问题,是传统开发模式的转变,从粗放的建设模式向生态文明发展模式的转变。但目前, 我国在“海绵城市”建设理论、方法和实践上还处于起步发展阶段,需要加强基于生态学、湿地生态系统服务、生态工程、城市规划和管理等多学科的交叉和融合研究,实现海绵城市和生态城市建设的多维目标。

参考文献(References):

[1]　欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 苗鸿. 水生态服务功能分析及其间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(10): 2091-2099.

[2]　Costanza R, D′Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O′Neill R, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van den belt M. The value of the world′s ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[3]　俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 傅微, 乔青, 王思思. “海绵城市”理论与实践. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.

[4]　徐宁, 戴启培. 基于海绵城市的绿地建设方案设计研究——以试点海绵城市池州为例. 居业, 2015, (16): 41-42.

[5] 伍业钢. 海绵城市设计：理念、技术、案例. 南京：江苏凤凰科学技术出版社，2016.

[6] 杨阳，林广思. 海绵城市概念与思想. 南方建筑，2015，(3)：59-64.

[7] Budge T. Sponge cities and small towns：a new economic partnership//Rogers M F，Jones D R，eds. The Changing Nature of Australia's Country Town. Ballarat，Australia：Victorian Universities Regional Research Network Press，2006.

[8] Bunster-Ossa I F. Sponge city //Pickett S T A，Cadenasso M L，McGrath B，eds. Resilience in Ecology and Urban Design：Linking Theory and Practice for Sustainable Cities. Dordrecht：Springer，2013：301-306.

[9] 俞孔坚，袁伟，李青，袁弘. "海绵城市"实践：北京雁栖湖生态发展示范区控规及景观规划. 北京规划建设，2015，(1)：26-31.

[10] 住房城乡建设部. 海绵城市建设技术指南-低影响开发雨水系统构建. 北京：中华人民共和国住房和城乡建设部，2014.

[11] 陈华. 关于推进海绵城市建设若干问题的探析. 净水技术，2016，35(1)：102-106.

[12] Rijke J，Farrelly M，Brown R，Zevenbergen C. Configuring transformative governance to enhance resilient urban water systems. Environmental Science & Policy，2013，25：62-72.

[13] 彭翀，张晨，顾朝林. 面向"海绵城市"建设的特大城市总体规划编制内容响应. 南方建筑，2015(3)：48-53.

[14] 车伍，吕放放，李俊奇，李海燕，王建龙. 发达国家典型雨洪管理体系及启示. 中国给水排水，2009，25(20)：12-17.

[15] 董哲仁，李文奇，孙东亚. 河流生态修复. 北京：中国水利水电出版社，2013.

[16] 俞孔坚. 美丽中国的水生态基础设施：理论与实践. 鄱阳湖学刊，2015，(1)：5-18.

[17] 俞孔坚，张蕾. 黄泛平原区适应性"水城"景观及其保护和建设途径. 水利学报，2008，39(6)：688-696.

[18] 俞孔坚，韩西丽，朱强. 解决城市生态环境问题的生态基础设施途径. 自然资源学报，2007，22(5)：808-816.

[19] 俞孔坚. 海绵城市——理论与实践. 北京：中国建筑工业出版社，2016.

[20] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望. 建设科技，2015，(1)：11-18.

[21] 李锋，王如松，赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施：现状、问题与展望. 生态学报，2014，34(1)：190-200.

[22] 海绵城市网. www.calid.cn，http://www.calid.cn/2015/11/2924，http://www.calid.cn/2016/03/7592，http://www.calid.cn/2016/04/8965，http://www.calid.cn/2016/02/6886(accessed in June 17，2017)

[23] 王岩松，张弛.《海绵城市建设国家建筑标准设计体系》解读. 建设科技，2016，(3)：53-54.

[24] 翟宝辉. 从"城市内涝"到"海绵城市"引发的生态学思考. 生态学报，2016，36(16)：4949-4951.

[25] 俞孔坚，李迪华. 城市景观之路——与市长们交流. 北京：中国建筑工业出版社，2003：149-153.

[26] 俞孔坚，张蕾. 基于生态基础设施的禁建区及绿地系统——以山东菏泽为例. 城市规划，2007，31(12)：89-92.

[27] 俞孔坚，张媛，刘云千. 生态基础设施先行：武汉五里界生态城设计案例探析. 规划师，2012，(10)：26-29.

[28] 俞孔坚. 海绵城市的三大关键策略：消纳、减速与适应. 南方建筑，2015，(3)：4-7.

[29] MEA (Millenium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-Being：Synthesis. Washington DC：Island Press，2005.

[30] 王超，王沛芳. 城市水生态系统建设与管理. 北京：科学出版社，2004.

[31] 张诚，曹加杰，王凌河，严登华，王刚，秦天玲. 城市水生态系统服务功能与建设的若干思考. 水利水电技术，2010，41(7)：9-13.

[32] 杨薇，杨志峰，孙涛. 湿地生态需水量与配水研究进展.湿地科学，2008，6(4)：531-535.

[33] 江波，欧阳志云，苗鸿，郑华，白杨，庄长伟，方瑜. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报，2011，31(8)：2236-2244.

[34] 徐翀崎，李锋，韩宝龙. 城市生态基础设施管理研究进展. 生态学报，2016，36(11)：3146-3155.

[35] 谢映霞. 中国的海绵城市建设：整体思路与政策建议. 人民论坛·学术前沿，2016，(21)：29-37.

[36] 马世骏，王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报，1984，4(1)：1-9.